

Article, Published Version

Eckert, P.

Beitrag zur mathematischen Modellierung des Geschiebetransportes in alluvialen Flachlandflüssen

Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106234>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Eckert, P. (1986): Beitrag zur mathematischen Modellierung des Geschiebetransportes in alluvialen Flachlandflüssen. In: Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau 50. Berlin: Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau. S. 5-23.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



1) Nr 627.152.123 Geschiebetransport
51: 53.079 Mathematische Modelle

Beitrag zur mathematischen Modellierung des Geschiebetransportes in
alluvialen Flachlandflüssen *)

Dipl.-Ing. P. ECKERT

Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau

1. Einleitung

Die ständige Entwicklung der Produktion und die intensive Nutzung der Naturressourcen erfordern unter anderem immer häufigere und umfangreichere Eingriffe in das natürliche Regime der Flüsse. Die Auswirkungen solcher Eingriffe sind oft schwer abzuschätzen und wirken sich insbesondere im Geschieberegime über weite Zeiträume aus. So kann beispielsweise die Sohlenerosion, hervorgerufen durch Wehre oder Regulierungsmaßnahmen, zu schwierigen Problemen für die Ufer, die Schifffahrt (z. B. Hafen- und Schleusenzufahrten), für den Grundwasserspiegel usw. führen. Aber auch die Geschiebeablagerungen infolge großer Wasserentnahmen am ungestauten Fluß für industrielle und landwirtschaftliche Zwecke können negative Auswirkungen, insbesondere für die Schifffahrt, haben /1/.

Bisher wurden umfangreiche Baumaßnahmen meist im hydraulischen Modellversuch auf ihre Funktionstüchtigkeit und Auswirkungen untersucht. Hierfür bestehen weitestgehend ausgereifte Methoden, die zuverlässige Ergebnisse liefern. Wegen des großen Aufwandes und Platzbedarfs für hydraulische Modelle kann jedoch nur ein sehr begrenzter Naturausschnitt dargestellt werden. Der Wunsch, einen weiteren Einflußbereich zu simulieren sowie die Verfügbarkeit leistungsfähiger Rechenmaschinen und numerischer Methoden führten in den letzten Jahrzehnten zur Entwicklung mathematischer Modelle. Je nach Kenntnisgrad der physikalischen Vorgänge und ihrer exakten mathematischen Formulierung können diese Modelle Funktionen der hydraulischen Modelle übernehmen oder ergänzen. So ist beispielsweise die Abflußsimulation (Hochwasserkontrolle, Abflußsteuerung) bereits weit fortgeschritten, wogegen bei der Simulation des Geschiebetransportes und seiner Folgen noch viele Unsicherheiten bestehen.

*) Vortrag auf der Internationalen Konferenz in Bratislava, Mai 1981

Aus den praktischen Erfordernissen heraus haben wir in der Forschungsanstalt die Erarbeitung mathematischer Modelle für den Geschiebetransport bzw. die Flußsohlenveränderungen in Angriff genommen. Der im ersten Beispiel untersuchte Flußabschnitt ist besonders für die Schifffahrt von großem Interesse, da hier auf unveränderliche Felsstrecken zum Teil bedeutende Erosionsstrecken folgen. Bei der Erarbeitung eines mathematischen Modells für diese Flußstrecke zeigt sich sehr deutlich, daß zur Testung exakte Prototypdaten erforderlich sind. Leider sind diese zum Teil lückenhaft oder fehlen ganz, wie in diesem Beispiel für die Randbedingungen des Geschiebetransportes. Um Probleme der Meßdaten beim Vergleich zwischen mathematischem Modell und Prototyp zu umgehen, wurde im zweiten Beispiel als Vergleichsobjekt ein in der Forschungsanstalt betriebenes hydraulisches Geschiebmodell gewählt. Zwar wurde dadurch nur eine kurze Flußstrecke simuliert, jedoch waren die Randbedingungen exakt vorgegeben.

2. Mathematisches Modell des Geschiebetransportes

Die Grundlagen für mathematische Geschiebetransportmodelle wurden bereits mehrfach ausführlich publiziert /2, 3, 4/, so daß nachfolgend nur noch die Ausgangsgleichungen angegeben werden. Dabei gelten folgende Voraussetzungen für die Simulation:

1. Es wird eine eindimensionale Bewegung des Wassers und Sediments betrachtet, und die Wasserspiegeländerungen erfolgen langsam.
2. Die Betrauigkeit bleibt zeitlich konstant, kann jedoch örtlich und in Abhängigkeit vom Durchfluß variieren. Diese Abhängigkeiten müssen bekannt sein.
3. Es wird nur mit einem charakteristischen Korndurchmesser des Geschiebes gerechnet.
4. Der suspendierte Sedimenttransport wird vernachlässigt.

2.1. Stetiges Modell

Das mathematische Modell der Strömungsvorgänge in offenen Gerinnen wird durch die Grundgleichungen von BARRE de SAINT-VENANT beschrieben.

Kontinuitätsbedingung:

$$\frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

Bewegungsgleichung:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} = -g J_e \quad (2)$$

Für das Energieliniengefälle soll der Ansatz von MANNING und STRICKLER eingesetzt werden:

$$J_e = \frac{v |v|}{M_R^{2/3}} \quad (3)$$

Der Sedimenttransport wird in der Literatur ebenfalls durch zwei Differentialgleichungen beschrieben /5, 6, 7, 8/.

Kontinuitätsbedingung:

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial g}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

Bewegungsgleichung:

$$g = f(v) \quad (5)$$

Symbolerläuterungen siehe auf Abb. 1.

Gleichung (5) stellt eine starke Vereinfachung des Sedimenttransportes dar. Mit Sicherheit hängt der Sedimenttransport von wesentlich mehr Einflußfaktoren als nur der Strömungsgeschwindigkeit ab. Es erscheint jedoch zweckmäßig, beim gegenwärtigen Stand der Forschung bereits in der Grund-

gleichung möglichst einfache Abhängigkeiten anzusetzen. Zum einen ist die Natur des Sedimenttransportes noch nicht restlos aufgeklärt, um daraus exakte Bewegungsgesetze zu formulieren und zum anderen soll das Gleichungssystem mit vertretbarem Aufwand lösbar sein. Für Gleichung (5) kann eine beliebige Sedimenttransportformel bzw. im Spezialfall des dominierenden Geschiebetransportes jede brauchbare Geschiebefrachtformel eingesetzt werden.

Die Lösung des Systems von vier Differentialgleichungen gestaltet sich aber auch damit noch sehr kompliziert, so daß weitere Vereinfachungen zweckmäßig sind. So wies de VRIES /6/ beispielsweise nach, daß wegen der sehr viel langsameren Bewegung des Geschiebes gegenüber der Flüssigkeitsströmung letztere als stationär betrachtet werden kann. Für einen stationären Strömungsansatz sprechen auch folgende Überlegungen:

1. Im ungestauten Flachlandfluß tritt eine relativ langsame Veränderung des Durchflusses auf.
2. Wegen der notwendigen Diskretisierung im mathematischen Modell und einer eindimensionalen Berechnung ist die natürliche Flußgeometrie stark vereinfacht.
3. Bei den vielfach ausgeführten hydraulischen Flußmodellen, die anerkannte Ergebnisse lieferten, wurde der Abfluß in mehreren Stufen stationär eingestellt.

Damit entfällt die lokale Beschleunigung ($\frac{\partial v}{\partial t} = 0$) und Gleichung (2) ergibt sich zu:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v^2}{2g} + H \right) = - J_e \quad (6)$$

Die Gleichung (1) kann dann in folgender Form geschrieben werden:

$$q = v \cdot h = \text{konstant bzw. } Q = v \cdot F = \text{konstant.} \quad (7)$$

Die Veränderung der Sohlenhöhe wird durch die Gleichung (4) beschrieben, in die eine Geschiebefrachtformel (Gl. 5) integriert wurde. Die Aufgabe besteht in der Lösung der Gleichungen (4) und (6). Nach /6, 8/ kann diese Lösung in Verbindung mit brauchbaren Randbedingungen in alternierenden Schritten erfolgen.

Schritt 1: Berechnung von v bei gegebenem z mit Gleichung (6)

Schritt 2: Berechnung von z bei gegebenem v mit Gleichung (4).

2.2. Diskretes Modell

Zur Lösung der Differentialgleichungen des Modells stehen verschiedene mathematische Schemata zur Verfügung /3, 5, 6, 9/. Dazu ist eine ortsdiskrete Approximation erforderlich. Der Flußlauf wird durch Querprofile in Abschnitte geteilt, wobei die für die Berechnung ausgewählten Querprofile den ihnen zugeordneten Flußabschnitt möglichst gut repräsentieren sollen. Innerhalb eines Abschnittes ändern sich die Parameter wie Geometrie, Rauigkeit, Sohlengefälle usw. nur wenig. Der Abstand zwischen den Profilen kann unterschiedlich sein, d. h. in relativ gleichförmigen Abschnitten kann ihr Abstand größer gewählt werden als in stark ungleichförmigen Abschnitten.

Die Anwendung eines diskreten Modells für die stationäre Wasserspiegel- und Sohlenberechnung wurde bereits von FELKEL /10/ publiziert. Dabei besteht die Möglichkeit, für Flußschlauch und Vorland unterschiedliche Rauigkeiten einzusetzen und auch die Fließlängen innerhalb eines Abschnittes zur Berücksichtigung von Krümmungen für Flußschlauch sowie linkes und rechtes Vorland einzeln zu berücksichtigen. Letzteres enthält jedoch die Problematik, daß die Strömungsrichtung über den Vorländern häufig von derjenigen im Fluß abweicht.

Im ortsdiskreten System (siehe Abb. 1) läßt sich die Bewegungsgleichung (Gl. 6) wie folgt schreiben:

$$\frac{1}{\Delta x} \left(\frac{v_i^2 - v_j^2}{2g} + H_i - H_j \right) = -J_e \quad (8)$$

und unter Berücksichtigung von Gleichung (3) und (7)

$$\frac{1}{\Delta x} \left(\frac{v_i^2 - v_j^2}{2g} + H_i - H_j \right) = - \frac{Q |Q|}{F_{ij}^2 M_{ij}^2 R_{ij}^{4/3}} \quad (9)$$

Diese Gleichung ist ausgehend von einer bekannten Randbedingung iterativ lösbar.

Für das ortsdiskrete Modell geht Gleichung (4) in eine Bilanzgleichung für jedes Profil über:

$$B_{s_{ij}} \frac{z_j^t - z_j^{t-\Delta t}}{\Delta t} \Delta x = G_i^t - G_j^t \quad (10)$$

Dies bedeutet, daß sich Ablagerungen oder Erosionen gleichmäßig über den gesamten Abschnitt zwischen zwei Profilen ausbreiten. Ebenso sind die Sohlenveränderungen innerhalb eines Zeitschrittes als stetig zu betrachten. So kann es sich beispielsweise ergeben, daß bei einem Profil, welches sich unter den hydraulischen Verhältnissen zum Zeitpunkt t in Alluvion befindet, bei großer Schrittweite Δt die Sohlenerhöhung Werte erreicht, die die hydraulischen Verhältnisse zum Zeitpunkt $t + \Delta t$ verfälschen. Bei intensiver Sohlenänderung macht sich deshalb eine Begrenzung der Zeitschrittweite erforderlich. Eine Interpretation der Ergebnisse ist also unbedingt notwendig, und gegebenenfalls sind die Berechnungen mit veränderten Zeitschritten zu wiederholen.

Zur Bestimmung des Geschiebetransportes in Gleichung (10) wurde eine in der FAS entwickelte Geschiebefrachtformel angewandt /11/.

$$g = A (q - q_0)^{1/2} \quad (11)$$

Diese Formel entstand durch systematische Forschung in Versuchsrinnen und hydraulischen Flußmodellen und hat sich seither speziell für Flachlandflüsse gut bewährt. Der Wert q_0 gibt den Abfluß an, bei dem die Geschiebewegung beginnt. Er ist abhängig von der Korngröße, Geschiebezusammensetzung und vom Sohlengefälle. Der Beiwert A berücksichtigt die Besonder-

heiten der Flußstrecke und beinhaltet somit alle von der Formel nicht detailliert erfaßten Abhängigkeiten.

2.3. Anfangs- und Randbedingungen

Die Berechnungen im mathematischen Modell laufen für einen bestimmten Zeitabschnitt der Natur, für den die entsprechenden Werte als Anfangsbedingungen vorzugeben sind. Die Querprofile wurden durchschnittlich im Abstand von 1 km angeordnet. Um eine möglichst gute Wiedergabe der Geometrie zu erreichen, erfolgte die Darstellung der gemessenen Profile entsprechend ihrer Unregelmäßigkeit mit bis zu 30 Stützstellen. Für jedes Profil wurde eine mittlere Sohlenhöhe berechnet, die damit die Ausgangsbedingung $z = z(x)$ zur Zeit $t = 0$ darstellt. Wichtig ist bei der Aufbereitung der Geometriedaten, daß speziell die Vorländer den hydraulischen Abflußverhältnissen der Natur entsprechen (z. B. sind abflußlose Senken auszuschalten). Da in der Rechnung von stationären Beziehungen ausgegangen wird, sind andere Anfangsbedingungen (z. B. $h = h(x)$) nicht notwendig.

An beiden Rändern der Flußstrecke sind Randbedingungen vorzugeben, mit denen das Problem lösbar wird. Am unterstromigen Rand muß die Beziehung zwischen Abflußmenge und Wasserspiegelhöhe $H = H(Q)$ bekannt und über die gesamte Berechnungszeit gültig sein, d. h. in diesem Querschnitt sollte sich die Flußsohle annähernd in einem Gleichgewichtszustand befinden ($z = \text{konstant}$). Für die Wasserströmung wird die oberstromige Randbedingung durch eine Ganglinie $Q = Q(t)$ gebildet. Diese Funktion, entweder gemessene jährliche Ganglinien oder eine über eine längere Jahresreihe gemittelte Ganglinie, wurde in eine Treppenkurve mit unterschiedlich langen Zeitschritten gegliedert. Für den Sedimenttransport muß ebenfalls eine oberstromige Randbedingung $G = G(t)$ vorgegeben werden. Leider sind dazu allerdings selten ausreichend Meßwerte vorhanden. In diesen Fällen und wenn keine anderen eindeutigen Randbedingungen vorhanden sind (z. B. Wehre ohne Geschiebedurchgang) kann versucht werden, aus Beobachtungen der Sohlenveränderungen oberhalb des zu untersuchenden Streckenabschnittes und unter Anwendung einer Geschiebefrachtformel den Geschiebetransport zu ermitteln.

3. Ergebnisse praktischer Berechnungen

Das angewandte Modell erlaubt eine getrennte Erfassung des Flusses und der Vorländer. Mit einem gesonderten Programm können die Rauigkeitsbeiwerte ebenfalls getrennt für Fluß und Vorländer ermittelt werden. Dies ist insofern von Bedeutung, da die Rauigkeitsbeiwerte für ein mathematisches Modell von den bisher gewohnten abweichen können. Alle für das Modell notwendigen Vernachlässigungen und Diskretisierungseinflüsse müssen durch den Beiwert ausgeglichen werden. Als Beispiel zeigt Abb. 2 das Ergebnis einer Beiwertberechnung für verschiedene in der Natur gemessene Wasserspiegellagen. Deutlich ergab sich eine Abhängigkeit vom Ort (Beschaffenheit des Gerinnes) und vom Abfluß. Im Hochwasserbereich konnten keine detaillierten Ergebnisse erzielt werden, da hier zusammenhängende Messungen fehlten.

3.1. Natürliche Flußstrecke

An einer morphologisch komplizierten Flußstrecke von etwa 27 km Länge sollten Untersuchungen für einen weiteren Ausbau im Interesse der Schifffahrt durchgeführt werden. Zur Eichung des mathematischen Modells standen Sohlenaufnahmen im Abstand von 11 Jahren, Wasserspiegelnivellements, Wasserstands-Abfluß-Beziehungen und Abflußganglinien zur Verfügung. Es fehlte die Randbedingung des Geschiebeeintrages am oberen Rand. Sie wurde aus den dort vorhandenen Sohlenveränderungen und Testläufen des mathematischen Modells ermittelt. Die Strecke wurde durch 29 Profile unterteilt. Zur Charakterisierung der Flußstrecke sollen die nachfolgenden kurzen Angaben dienen:

Alluvialer Flachlandfluß mit Verzweigungen, feinem Geschiebe sowie Abschnitten mit felsigem Untergrund und relativ großem Gefälle (allgemeines Gefälle $I \approx 1 : 4800$, mittlerer Korndurchmesser $d_{50} \approx 0,7 \text{ mm}$) /12/; die Flußstrecke ist mit Buhnen und Längswerken reguliert; es wurden die natürlichen Abflußganglinien verwandt.

Den Vergleich der Ergebnisse des mathematischen Modells mit den Messungen in der Natur verdeutlicht ein Sohlenlängsschnitt (Abb. 3). Das Modell liefert eine zufriedenstellende Simulation der natürlichen Sohlenveränderungen. Die maximale Abweichung liegt mit 29 cm im Profil 22. Dieses Profil befindet sich zwischen zwei felsigen Abschnitten mit zum Teil stark unsymmetrischen Fließquerschnitt. Die hier vorhandenen hydraulischen Verhältnisse werden durch das stationäre Modell nicht genau erfaßt (siehe Wasserspiegellagen in Abb. 2) /13/. Für die Profile mit felsigem Untergrund wurde die Sohle als unveränderlich programmiert. Im Bereich der Profile 13 bis 15 ist ein verstärkter Schiffsverkehr mit Propulsions- und Steuerungseinflüssen (Hafeneinfahrt) vorhanden, die vom Modell ebenfalls nicht wiedergespiegelt werden können. Wie bereits erwähnt, wurde die linke Randbedingung des Geschiebes aus Sohlveränderungen rekonstruiert. Während der Testrechnungen zeigte sich sehr anschaulich, wie sich eine zu große bzw. zu kleine Annahme des Geschiebeeintrages durch flußabwärts fortschreitende Alluvion bzw. Erosion auswirkte. Die durchschnittliche Abweichung der berechneten von der gemessenen mittleren Sohlenlage beträgt 2,3 cm.

2.3. Hydraulisches Flußmodell

Aus einem Fluß sollen durch einen offenen Entnahmekanal größere Wassermengen für die Durchflußkühlung eines Kraftwerkes entnommen und unterhalb wieder eingeleitet werden. Die Entnahme erfolgt ohne Stauanlage und ist zeitlich veränderlich (Abb. 4). Die damit zusammenhängenden Probleme wurden in hydraulischen Modellversuchen untersucht /14, 15/. Bezüglich der Sedimentation waren u. a. Ausbaumaßnahmen am Fluß im Bereich der Entnahme, der Mittelstromzone und der Rückführung im Interesse der Sicherung der Schiffahrtstiefen zu ermitteln. Diese Modelluntersuchungen wurden als Vergleich für das mathematische Modell genutzt. Die Simulation erfolgte deshalb auch mit Modellwerten.

Zur Charakterisierung der Flußstrecke sollen die nachfolgenden kurzen Angaben dienen:

Alluvialer Flachlandfluß mit feinem Geschiebe (allgemeines Gefälle $I \approx 1 : 5600$, mittlerer Korndurchmesser $d_{50} \approx 0,7 \text{ mm}$) /12/; die Flußstrecke ist mit Buhnen reguliert. Für die Untersuchungen wurde aus langjährigen Abflußreihen eine Ganglinie gebildet. Die 3 km lange Strecke (im hydraulischen Modell 47 m) wurde durch 28 Profile unterteilt.

Den Vergleich der Ergebnisse des mathematischen Modells mit den Messungen am hydraulischen Modell zeigt die Abb. 5. Da im hydraulischen Modell stationäre Abflüsse eingestellt wurden, bietet es günstige Voraussetzungen für die Anwendung des beschriebenen mathematischen Modells. Die erforderlichen Randbedingungen konnten exakt gemessen werden. Des weiteren war im hydraulischen Modell ein reiner Geschiebetransport vorhanden (keine Suspensionen), so daß die Anwendung der Geschiebetransportgleichung (11) akzeptiert werden kann. Andererseits verdeutlicht das Beispiel die Diskrepanz zwischen Kontinuum (Natur, hydraulisches Modell) und diskretem Modell. Im Bereich der Entnahme und Wiedereinleitung sind die Vorgänge mindestens zweidimensional ausgeprägt, werden aber nur eindimensional wiedergegeben. Deshalb können besonders in diesen Bereichen größere Abweichungen auftreten. Weiterhin wird das Geschiebe im mathematischen Modell nur durch einen Korndurchmesser charakterisiert, während im hydraulischen Modell ein Korngemisch eingesetzt wurde. Somit ist es nicht möglich, Kornsortierungen in Krümmungen sowie bei der Entnahme und Wiedereinleitung zu simulieren. Einen Einfluß auf die Genauigkeit des Vergleichs hat auch die Geschiebebewegung selbst. Die gemessene Sohlenlage ist ein Augenblickszustand. Unter Berücksichtigung dessen, daß der Geschiebetransport in Form von Transportkörpern (Riffel, Dünen, Bänke) vorschiebt, kann die gemessene Sohlenhöhe innerhalb der Transportkörperhöhe schwanken.

Zur Vermeidung schifffahrtsbehindernder Geschiebeablagerungen im Entnahmebereich und in der Zwischenstromzone sind flußbauliche Maßnahmen erforderlich /14/. Im Modell wurde die Wirkung von drei Verbauungsgraden (Breiteneinschränkungen des Fließquerschnitts) untersucht. Als Beispiel sind die Ergebnisse für das Verbauungsverhältnis $B'/B = 0,106$ in Abb. 5 mit dargestellt (B' = Buhnenvorstreckung, B = ursprüngliche Streichlinienbreite) und Abb. 6 zeigt den zeitlichen Verlauf der Sohlenänderung einiger Profile für den Fall ohne Querschnittsverbau.

4. Schlußfolgerungen

Aus dem Vergleich der berechneten und gemessenen Sohlenlagen ist die Schlußfolgerung möglich, daß sorgfältig vorbereitete mathematische Modelle auf Veränderungen der Flußsohle angewandt werden können. Sie geben die qualitative Entwicklung der Sohle über lange Zeiträume an und demonstrieren die Wirkung von baulichen Maßnahmen.

Bei der Simulation sollten folgende Punkte beachtet werden:

1. Die ausgewählten Profile müssen den ihnen zugeordneten Flußabschnitt repräsentieren. Ihr Abstand ist entsprechend der Flußcharakteristik zu wählen (im Beispiel maximal etwa 1 km).
2. Die Anzahl der Koordinatenpunkte zur Darstellung eines Profils ist entsprechend der Geometrieungleichförmigkeit sowie hinsichtlich der geforderten Genauigkeit und des Rechenaufwandes optimal zu wählen (im Beispiel bis zu 30 Stützstellen).
3. Die Wiedergabe der Geometrie, insbesondere der Vorländer muß den hydraulischen Abflußverhältnissen entsprechen und nicht nur formal dem natürlichen Relief (z. B. sind abflußlose Senken auszuschalten).
4. Die Rauigkeitsbeiwerte sind dem mathematischen Modell anzupassen.
5. Für jeden Querschnitt ist ein repräsentativer Korndurchmesser zu bestimmen.
6. Aus der Kenntnis des natürlichen Flusses heraus muß eine geschiebeführende Sohlenbreite (Breite der Flußsohle, auf der Geschiebetransport möglich ist) festgelegt werden.
7. Die Randbedingungen sind möglichst genau vorzugeben und die Zeitschrittweiten zu kontrollieren.
8. Die Ergebnisse müssen aus der Sicht des Ingenieurs interpretiert werden.

5. Literaturangaben

- / 1/ GLAZIK, G.: Veränderungen der Wasserspiegel- und Sohlenlage der Elbe. Wasserwirtschaft-Wassertechnik, 1964, Nr. 11.
- / 2/ de VRIES, M.: Considerations about non-steady bed-load transport in open channels. XIth Congress of the IAHR, Leningrad 1965.
- / 3/ VREUGDENHIL, C. B., de VRIES, M.: Computations on non-steady bed-load transport by a pseudo-viscosity method. XIIth Congress of the IAHR, Fort Collins 1967.
- / 4/ DAUBERT, A., LEBRETON, J. C.: Etude expérimentale et sur modèle mathématique de quelques aspects de processus d'érosion des lits alluvionnaires en régime permanent et non-permanent. XIIIth Congress of the IAHR, Fort Collins 1967.
- / 5/ CUNGE, J. A., PERDREAU, N.: Mobile Bed Fluvial Mathematical Models. La Houille Blanche, 1973, Nr. 7.
- / 6/ de VRIES, M.: Solving river problems by hydraulic and mathematical models. Conference "Selected problems from the theory of simulation of hydrodynamic phenomena", Polish Academy of Sciences, Jablonna 1969.
- / 7/ de VRIES, M.: River-bed variations-aggradation and degradation. Publication Delft Hydraulics Laboratory, Nr. 107, 1973.
- / 8/ de VRIES, M.: van der ZWAARD, J. J.: Movable-bed river-models. Publication Delft Hydraulics Laboratory, Nr. 156, 1975.
- / 9/ KYOZO SUGA: On the simulation of river-bed variation by characteristics. XIIIth Congress of the IAHR, Kyoto 1969.

- /10/ FELKEL, K.: Programme pour le calcul par ordinateur des modifications du niveau du fond et de la surface des eaux dans une riviere par suite du charriage. XXIIInd Congress of the PIANC, Paris 1969.
- /11/ GLAZIK, G.: Ergebnisse neuerer modellmäßiger Untersuchungen über die Geschiebebewegung in Flachlandflüssen. Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau, Schriftenreihe Wasser- und Grundbau, Nr. 29, Berlin 1971.
- /12/ GLAZIK, G.: Zusammenhänge zwischen Geschiebeabrieb und Gefälle mitteleuropäischer Flachlandflüsse. Internationale Konferenz über hydraulische Forschung, Brno 1967, Publ. Technical University Brno, Vol. 8-5.
- /13/ GLAZIK, G.: Causes of local changes of the level of regulated alluvial river-beds and the elaboration of counter-measures by means of river scale model tests. XIVth Congress of the IAHR, Paris 1971.
- /14/ FUEHRER, M.,
THIELER, H.: Hydraulische und hydrothermische Probleme der Kühlwasserversorgung von Wärmekraftwerken aus ungestauten Flußläufen. Wasserwirtschaft-Wassertechnik, 1976, Nr. 12.
- /15/ GLAZIK, G.,
THIELER, H.: Principles for an adequate hydraulic outlining of side water intakes at rivers with special regard of the sedimentation problem. XVIIIth Congress of the IAHR, Cagliari 1979, Seminar 1: Sedimentation problems originating from withdrawing water from rivers.

g - Erdbeschleunigung
 M - Widerstandsbeiwert nach MANNING
 $R = F/U$
 t - Zeit
 v - Geschwindigkeit

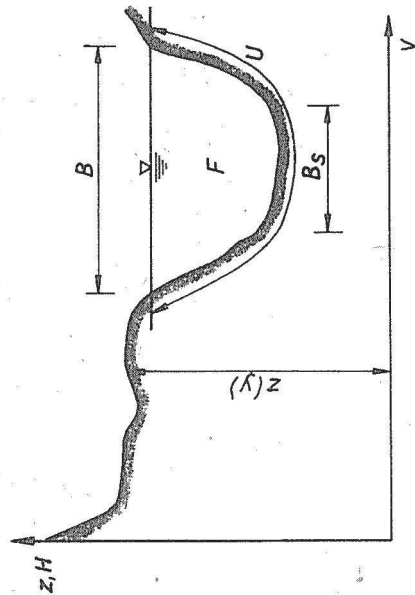
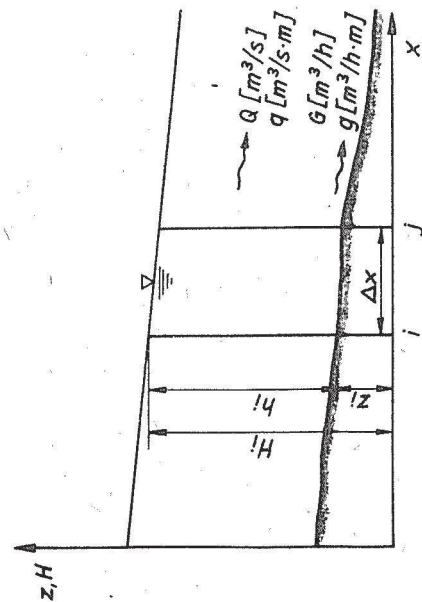


Abb.1 Definitionsskizze

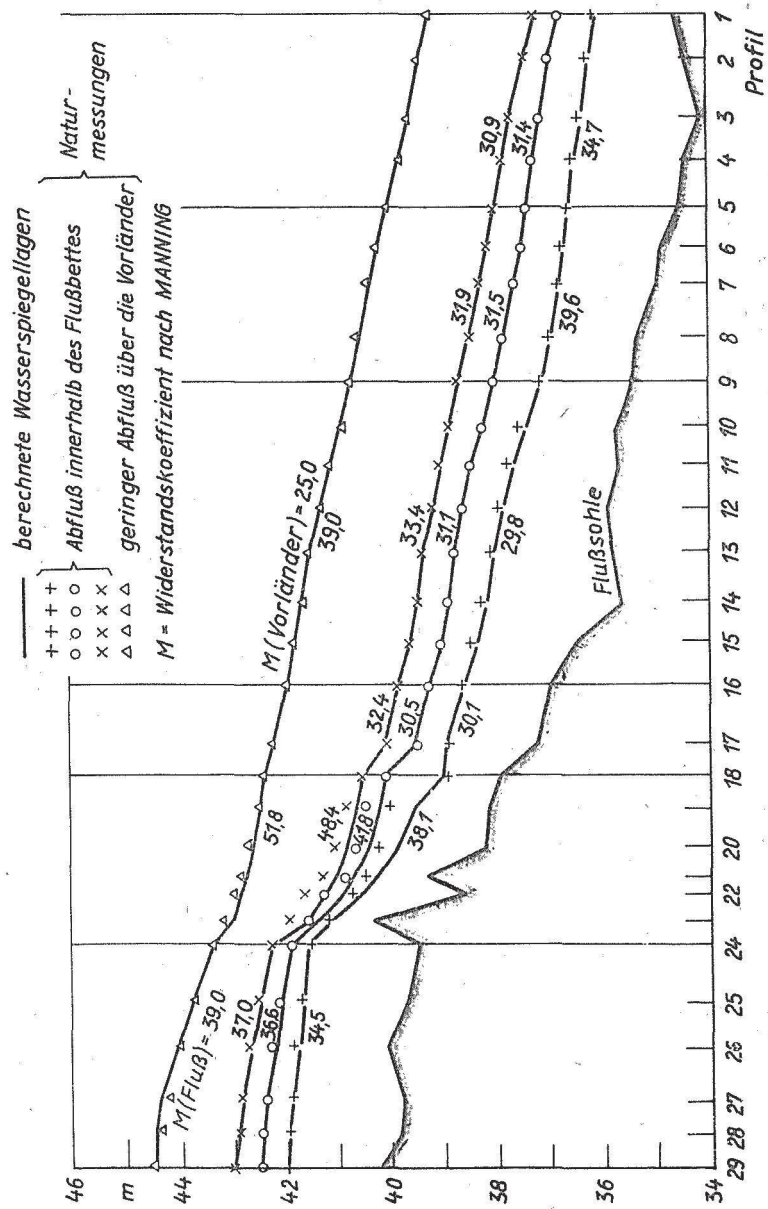


Abb. 2 Vergleich der berechneten mit in der Natur gemessenen Wasserspiegellagen

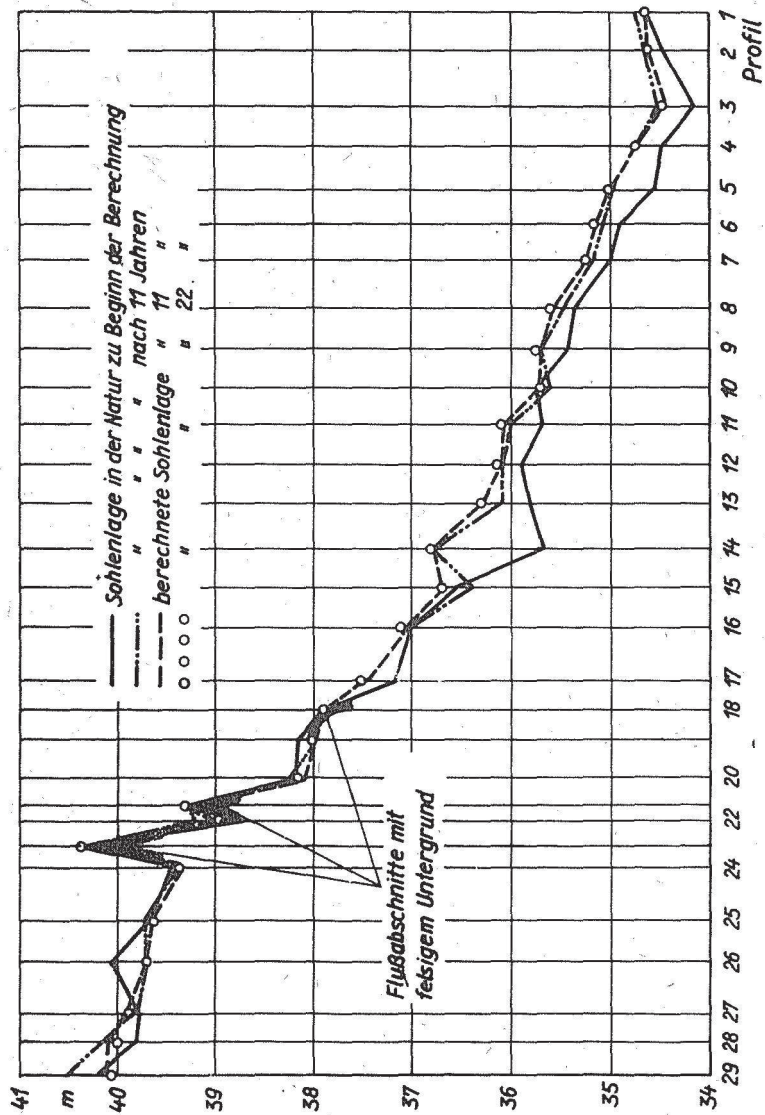


Abb. 3 Vergleich der Lage der Flußsohle aus dem mathematischen Modell mit Naturmessungen

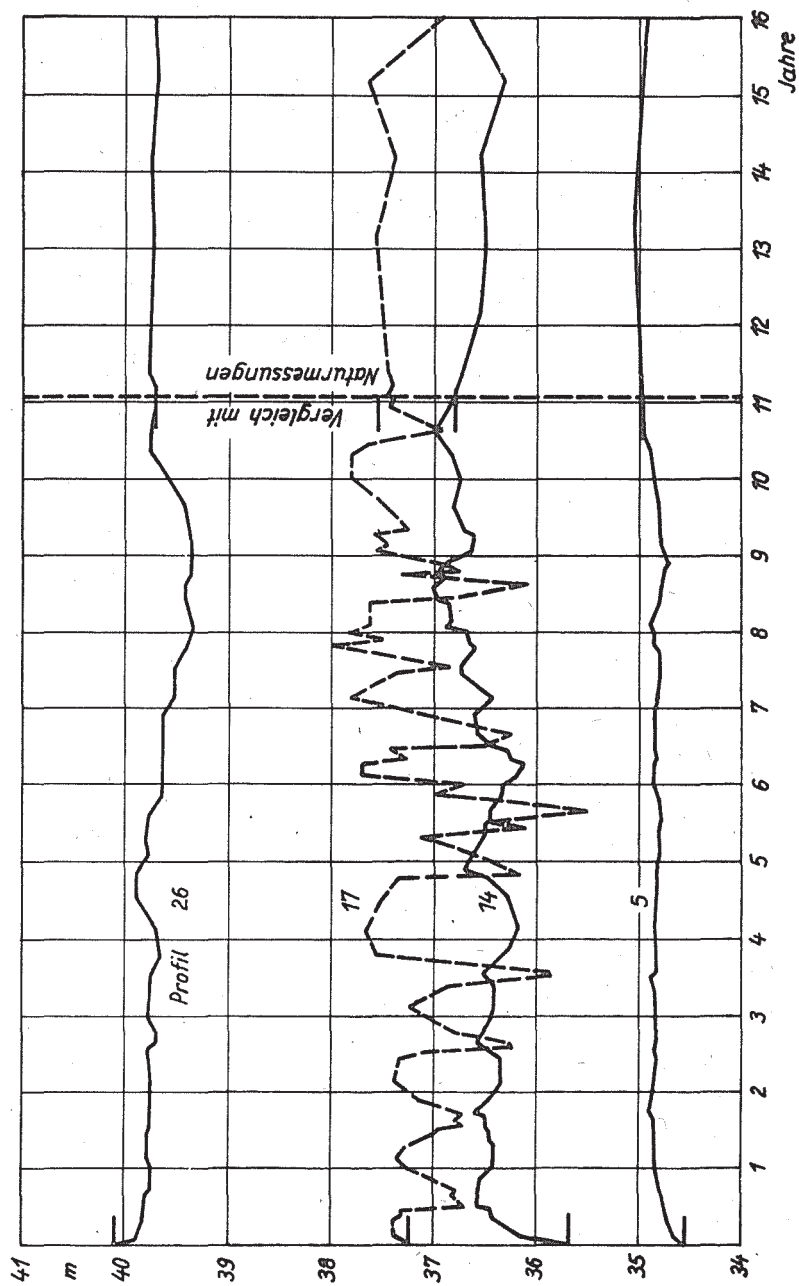


Abb. 4 Zeitlicher Verlauf der Sohlenänderung im mathematischen Modell

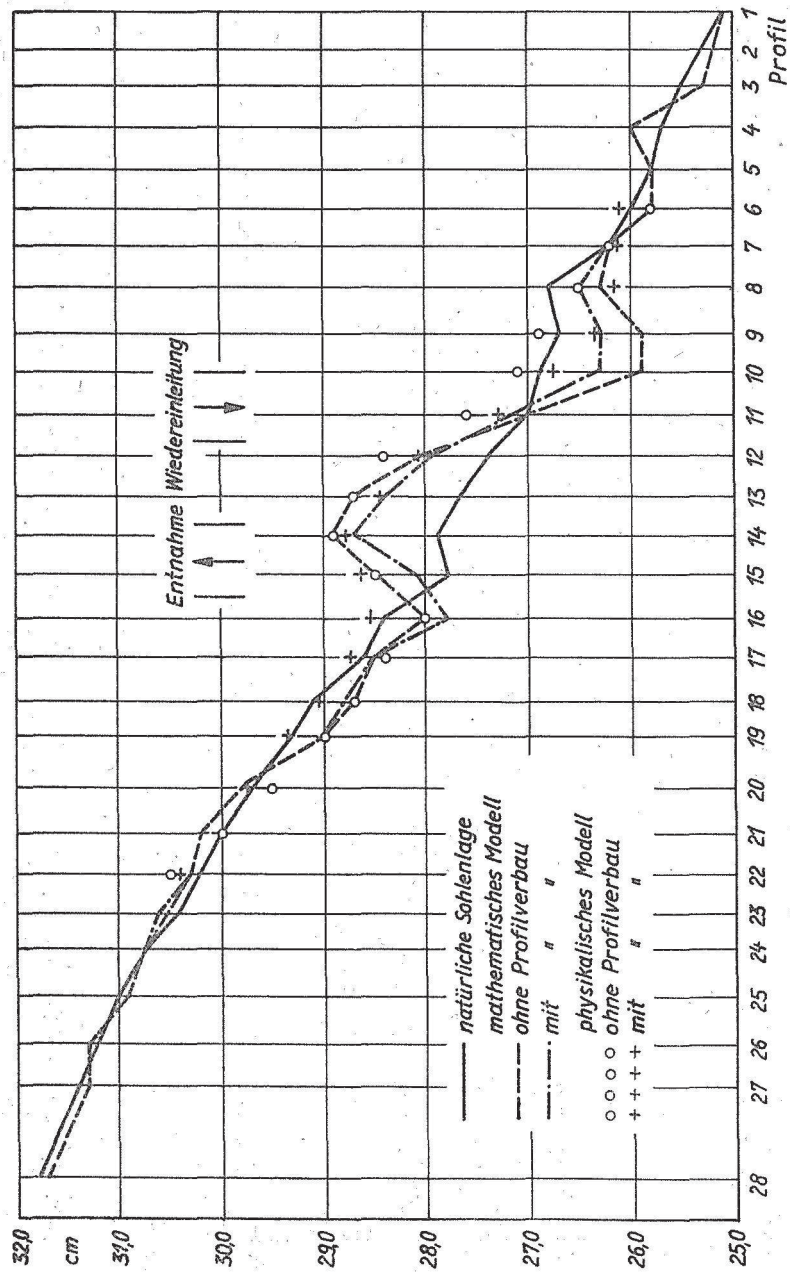


Abb. 5 Vergleich der Lage der Flußsohle aus dem hydraulischen und mathematischen Modell (in Modellwerten)

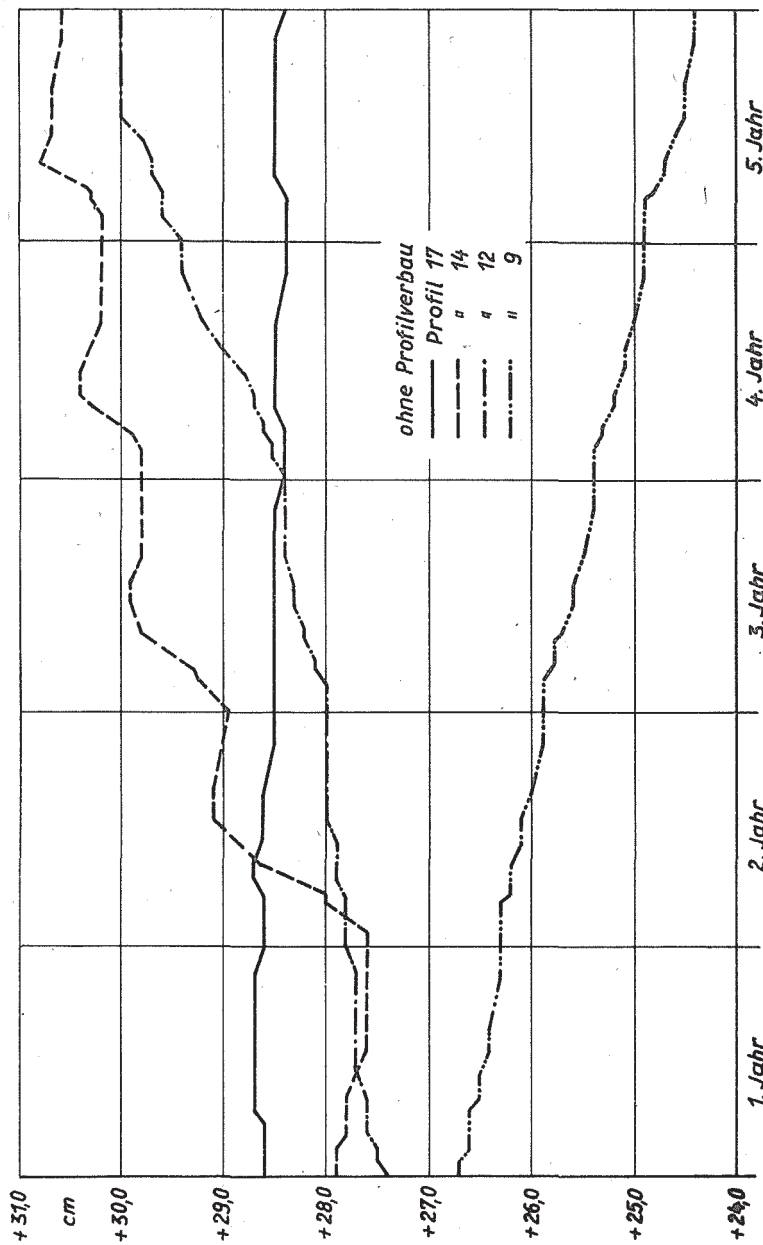


Abb. 6 Zeitliche Veränderung der Flußsohle im mathematischen Modell
(in Modellwerten)